Journal of Agroecology
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

Research Article
Vol. 14, No. 3, Fall 2022, p. 429-448

Assessing the Energy Components and the Environmental Impacts of the Different Rice (*Oryza sativa* L.) Production Systems using the Life Cycle Assessment (LCA) Method in Mazandaran

Z. Saber[1], M.A. Esmaeili[2], H. Pirdashti[3*], A. Motevali[4] and A. Nabavi-Pelesaraei[5]

Received: 11-01-2021
Revised: 18-04-2021
Accepted: 26-05-2021
Available Online: 13-12-2022

How to cite this article:
Saber, Z., Esmaeili, M.A., Pirdashti, H., Motevali, A., and Nabavi-Pelesaraei, A., 2022. Assessing the energy components and the environmental impacts of the different rice (*Oryza sativa* L.) production systems using the life cycle assessment (LCA) method. Journal of Agroecology 14(3): 429-448.
DOI: 10.22067/agry.2021.68179.1010

Introduction

Rice, as the second most strategic crop, is the most important cereal after wheat. In Iran, rice is so essential that people consume it as part of their main meal at least once daily. Due to the increase in consumption inputs in conventional paddy systems, chemical control of rice diseases, and consequently, increase in consumption costs, irreparable environmental damage of these systems always adds to the need to pay attention to alternative systems. Prediction of agricultural energy output and environmental impacts play the most important role in the conservation of the environment as well as energy management. A wide range of methods tapping into environmental performances related to agricultural activities has been proposed, among which the known life cycle assessment (LCA) method is deemed mostly employed. As a standard method that aims for holistic evaluation of the environmental resources and impact, LCA measures the process of a product's entire life cycle, or in other words, the analysis of the possible environmental impacts any product bears during their life would be assessed by LCA.

Materials and Methods

This research was conducted in rice fields located in Mazandaran province in Babol, Fereydounkenar, and Amol counties as the main rice paddy center of Mazandaran province, in the 2019 cropping season. Each of the systems was examined in terms of energy components and environmental impacts. In this study, to classify and quantify the environmental effects of rice production in various cropping systems using the LCA method and also the energy components and energy efficiency in these systems are addressed. Therefore, in order to evaluate the emission of

1- PhD Candidate in Agronomy, Department of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
2- Associate Professor, Department of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
3- Professor, Department of Agronomy, Genetics and Agricultural Biotechnology Institute of Tabarestan, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.
4- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Biosystems, Department of Agronomy Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
5- PhD in Agricultural Mechanization Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
* Corresponding author: h.pirdashti@sanru.ac.ir

greenhouse gases and energy in paddy fields, the required information was randomly collected from some farms through direct interviews with the rice growers of Mazandaran. In this regard, the sample size is calculated by using Cochran's formula.

Results and Discussion

The findings of this study showed that the maximum amount of input energy is equal to 60225.42 MJ / ha in conventional systems, and the minimum values of 18662.14 MJ / ha were allocated to the organic system. Diesel fuel input energy had the largest share of total input energy. The highest energy efficiency of 0.17 kg per MJ and energy ratio of 2.57 was allocated to the organic system. Also, the evaluation of the life cycle in rice production showed that in the global warming group of environmental impact by CML2 baseline method, for each ton of paddy produced in conventional, low-input, and organic systems, respectively, about 2408.90,1777.85 and 1193.79 kg of carbon dioxide equivalent to the atmosphere are released. Direct emissions from on-farm activities in all three studied systems have played a major role in increasing global warming. The source of these pollutants is the combustion of diesel used in agricultural implements and machinery, as well as the emission of nitrogen dioxide, nitrogen oxides, and other nitrogenous compounds resulting from the use of nitrogen fertilizer.

Conclusion

According to the results of this research work, from the environmental perspective, the organic system has highly the best potential of being recommended followed by a low external input system in order to reach environmentally friendly agriculture as sustainable cultural operations in comparison with conventional cultivation practices. Farther, the results showed that the conventional system had the highest amount of total emissions, and then the low input system was in the next position. Obviously, the organic system is the most environmentally friendly system, and the conventional system has the highest amount of emissions. In order to give a broader evaluation of the organic and some low input systems, studies on such issues should be highly continued.

Acknowledgments

Thanks and appreciation for the financial support provided by the Department of Agronomy, Sari Agricultural Sciences, and the Natural Resources University of Sari, Iran.

Keywords: Ecosystem quality, Energy efficiency, Life cycle assessment, Low input system, Organic system, Rice production.

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: http://agry.um.ac.ir/

مقاله پژوهشی

بررسی مؤلفه‌های انرژی و اثرات زیست‌محیطی در سامانه‌های مختلف زراعی تولید برنج (*Oryza sativa* L.) با استفاده از روش ارزیابی چرخه زندگی در مازندران

زهرا صابر[1]، محمدعلی اسماعیلی[2]، همت‌اله پیردشتی[3]*، علی متولی[4] و اشکان نبوی پله سرائی[5]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵

صابر، ز.، اسماعیلی، م. ع.، پیردشتی، ه.، متولی، ع.، و نبوی پله سرائی، ا.، ۱۴۰۱. بررسی مؤلفه‌های انرژی و اثرات زیست‌محیطی در سامانه‌های مختلف زراعی تولید برنج (*Oryza sativa* L.) با استفاده از روش ارزیابی چرخه زندگی در مازندران. بوم‌شناسی کشاورزی ۱۴(۳): ۴۴۸-۴۲۹.

چکیده

برنج (*Oryza sativa* L.) به‌عنوان دومین محصول راهبردی پس از گندم، از جمله مهم‌ترین گونه‌های غلات در سراسر دنیا به‌شمار می‌رود. با توجه به افزایش نهاده‌های مصرفی در سامانه‌های متداول برنج، کنترل شیمیایی علف‌های هرز، آفات و بیماری‌های برنج و به تبع آن افزایش هزینه‌های مصرفی، آسیب‌های جبران‌ناپذیر زیست‌محیطی این دست از سامانه‌ها، همواره بر لزوم توجه هر چه بیشتر به سامانه‌های جایگزین از جمله کم‌نهاده و ارگانیک می‌افزاید. این پژوهش در مزارع برنج واقع در استان مازندران در شهرستان‌های بابل، فریدون‌کنار و آمل به‌عنوان قطب‌های تولید برنج استان مازندران در سال ۱۳۹۸ انجام شد. هر یک از سامانه‌های مورد نظر به لحاظ مؤلفه‌های انرژی و اثرات زیست‌محیطی بررسی شدند. در این پژوهش، اثرات زیست‌محیطی تولید برنج در سامانه‌های گوناگون زراعی با استفاده از روش ارزیابی چرخه زندگی (LCA) و همچنین بررسی مؤلفه‌های انرژی و بهره-وری انرژی در این سامانه‌ها طبقه‌بندی و کمّی‌سازی شده است. برای ارزیابی نشر گازهای گلخانه‌ای و مصرف انرژی در شالی زارها، اطلاعات مورد نیاز به‌صورت مصاحبه از تعداد ۲۱۲ شالی‌کار با وسعت یک هکتار زمین زراعی گردآوری و مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های این پژوهش نشان داد که حداکثر میزان انرژی ورودی معادل ۶۰۲۲۵/۴۲ مگاژول بر هکتار در سامانه‌های متداول و حداقل مقادیر آن معادل ۱۸۶۶۲/۱۴ مگاژول بر هکتار به سامانه ارگانیک تعلق یافت. انرژی ورودی سوخت دیزل بیشترین سهم را در کل انرژی‌های ورودی دارا بود. بالاترین میزان بهره‌وری انرژی ۰/۱۷ کیلوگرم بر مگاژول و نسبت انرژی ۲/۵۷ به سامانه ارگانیک اختصاص یافت. همچنین، ارزیابی چرخه‌ی زندگی در تولید برنج نشان داد در گروه تأثیر زیست‌محیطی گرمایش جهانی با روش CML2 baseline به‌ازای تولید هر تن شلتوک در سامانه‌های متداول، کم‌نهاده و ارگانیک به‌ترتیب در حدود ۲۴۰۸/۹۰، ۱۷۷۷/۸۵ و ۱۱۹۳/۷۹ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن معادل به اتمسفر انتشار می‌یابد. انتشارات مستقیم ناشی از فعالیت‌های درون مزرعه‌ای در هر سه سامانه مورد مطالعه سهم عمده و اصلی را در افزایش گرمایش جهانی داشته‌اند. منشأ این نوع آلایندگی‌ها احتراق دیزل مصرفی در ادوات کشاورزی و ماشین‌آلات و نیز انتشار دی‌اکسید نیتروژن، اکسیدهای نیتروژن‌دار و دیگر ترکیبات نیتروژن‌دار حاصل از مصرف کود نیتروژن می‌باشند. همچنین، نتایج

۱- دانشجوی دکتری تخصصی زراعت، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
۲- دانشیار گروه زراعت، دانشکده علوم زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
۳- استاد گروه زراعت، پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
۴- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
۵- دانش‌آموخته دکتری تخصصی مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

(*- نویسنده مسئول: Email: h.pirdashti@sanru.ac.ir)

DOI: 10.22067/agry.2021.68179.1010

نشان داد در جمع کل انتشارات، سامانه متداول بیشترین میزان انتشارات را داشته است و بعد از آن سامانه کم‌نهاده در جایگاه بعدی قرار دارد. بر اساس یافته‌ها، دو سامانه ارگانیک و کم‌نهاده به لحاظ زیست‌محیطی از اثرات منفی کمتری برخوردار هستند. در این راستا، می‌توان از راهبردهای پایدار اکولوژیک از جمله کاهش خاک‌ورزی، استفاده از کودهای آلی و بیولوژیک به‌منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف بیش از حد نهاده‌ها به‌ویژه در سامانه‌های متداول بهره گرفت.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی چرخه زندگی، شلتوک، سامانه ارگانیک، سامانه کم‌نهاده، کارایی مصرف انرژی، کیفیت اکوسیستم

مقدمه

امروزه، رشد روزافزون جمعیت جهان و ارتقای سطح زندگی بشر، نیاز به مواد غذایی را دوچندان ساخته است. در این میان، توجه به بخش کشاورزی به مثابه مؤثرترین مؤلفه در فراهم‌آوری مواد غذایی در تغذیه بشر با تولید محصولاتی همچون برنج، بسیار حائز اهمیت است. برنج (*Oryza sativa* L.) غلهای مهم و غذای عمده بیش از دو سوم جمعیت جهان را فراهم می‌آورد (AghaAlikhani et al., 2013). آمار جهانی، حکایت از تولید ۷۵۹/۶ میلیون تن شلتوک و ۵۰۳/۹ میلیون تن برنج سفید در سال ۲۰۱۷ دارد (FAO, 2018). کشاورزی مدرن و بهره‌مند از فناوری‌های متعارف، به‌منظور پاسخ‌گویی به نیاز روزافزون غذا برای جمعیت رو به رشد سیاره زمین و فراهم کردن مواد غذایی کافی و مناسب، گام‌هایی جدی برداشته است (Hatirli et al., 2005)؛ با این‌حال، این نکته را نباید از نظر دور داشت که امکانات و فراهم‌سازی تولید انبوه مواد غذایی، به‌میزان زیادی وابسته به کاربرد مواد شیمیایی است. بی‌تردید کشاورزی با فناوری‌های نوین و استفاده از محصولات شیمیایی و سموم متنوع، مشکلات زیادی را در جهان و به‌ویژه در ایران برای منابع طبیعی و بشر به‌وجود آورده است که از آن جمله می‌توان به تخریب بوم‌نظام‌های طبیعی و کشاورزی، افزایش ضایعات محصولات کشاورزی، سوء تغذیه و بیماری در اثر کاهش کیفیت مواد غذایی، کاهش تنوع زیستی، افزایش گرمایش جهانی و آلودگی هوا، خاک و آب اشاره نمود (Nemecek et al., 2011). با این‌همه، یکی از راهبردهای مناسب برای حل معضلات یاد شده، کشاورزی ارگانیک، پایدار و سازگار با محیط زیست است که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهش گران این حوزه قرار گرفته است و هدف آن ضمن حفاظت از حاصلخیزی خاک، افزایش تولید محصول با کم‌ترین تکیه بر استفاده از مواد شیمیایی می‌باشد (Esitken et al., 2005). اگرچه برخی مطالعات نشان دادند که کاهش استفاده از کودهای شیمیایی و سموم در سامانه‌های سازگار با محیط زیست و ارگانیک برنج به کاهش اثرات زیست‌محیطی منجر می‌شود (Yodkhum et al., 2017; Hokazono & Hayashi, 2015)، بررسی‌های دیگر حاکی از آن است که سامانه‌های ارگانیک برنج لزوماً به کاهش بار زیست محیطی در مقایسه با سامانه‌های متداول تولید برنج منتهی نمی‌شوند (Blengini et al., 2009;Hokazono & Hayashi, 2012). علاوه‌براین، با توجه به اثرات مخرب کاربرد نامناسب منابع مختلف انرژی بر سلامتی انسان و محیط زیست و محدودیت منابع طبیعی، الزام مطالعه الگوهای مصرف انرژی به‌منظور کاربرد مطلوب از آن را در بخش کشاورزی حیاتی ساخته است (Mousavi-Avval et at., 2011). پژوهش‌های اخیر حکایت از آن دارند که با افزایش مکانیزه نمودن و کاربرد نامناسب مواد شیمیایی در کشاورزی، به‌تدریج کارایی انرژی مصرفی در سامانه‌های کشاورزی کاهش می‌یابد. درگذر زمان نیز کشاورزی اولیه، به‌مراتب پایداری بیشتری نسبت به کشاورزی فشرده امروزی داشته است (Tabatabaie et al., 2013).

دو اصل تأثیرگذار در مدیریت پایدار بوم‌نظام‌های زراعی را می‌توان افزایش کارایی مصرف انرژی و نیز منابع دانست (Risoud, 2000). با این‌حال، تجزیه و تحلیل پارامترهای انرژی، به‌تنهایی نمی‌تواند درک مناسبی از سامانه‌های کشاورزی را ارائه دهد (Rathke & Diepenbrock, 2006). به‌رغم پژوهش‌های نسبتاً جامع در مورد کارایی انرژی در محصولات کشاورزی در کشور، همچنان اطلاعات جامعی از اثرات زیست‌محیطی محصولات زراعی یاد شده و هزینه‌های مربوط به آن‌ها در دسترس نیست. پژوهش‌های اخیر، اغلب به‌صورت کاملاً جداگانه، مراحل گوناگون مربوط به هر یک از فرآیندهای تولید را مورد مطالعه قرار داده‌اند و سمت و سوی بیشتر بررسی‌ها بیشتر مربوط به‌میزان انرژی مصرفی بوده و اثرات زیست‌محیطی در هرکدام از بخش‌ها مورد مطالعه قرار نگرفته است.

برای مطالعه اثرات زیست‌محیطی سامانه‌های کشاورزی، روش‌های متعددی وجود دارد (Schröder et al., 2003). با کمک این رهیافت‌ها می‌توان اثرات زیست‌محیطی سامانه‌های محصولات

مختلف زراعی را تجزیه و تحلیل و نیز سیستم‌های متناسب به لحاظ کاهش آلودگی و مصرف بهینه‌ی منابع را شناسایی و معرفی نمود. پژوهشگران بسیاری (برای نمونه: Sahle & Potting, 2013; Finkbeiner et al., 2006 Brentrup et al., 2004) بر این باورند که با توجه به دامنه وسیع کارکردهای روش آنالیز چرخه زندگی[1] (LCA)، این روش از جمله مناسب‌ترین روش به‌منظور بررسی پایداری وضعیت فعالیت‌های کشاورزی است. آنالیز چرخه زندگی روشی است که در آن تمام اثرات زیست محیطی مرتبط با یک محصول (شامل کالاها و خدمات)، در کل چرخه زندگی آن از مرحله استخراج و یا جمع‌آوری مواد خام، تا مصرف، بازیافت و یا امحاء ضایعات ناشی از آن ارزیابی می‌گردد؛ در این رهیافت با بررسی جامع و دقیق، تمامی منابع مصرفی به‌منظور تولید محصول و تمامی مواد انتشار یافته به محیط زیست، کمّی‌سازی و بررسی می‌شوند (Pennington et al., 2004;Rebitzer et al., 2004). لذا، این رویکرد می‌تواند امکان بررسی روش‌های مختلف را از جنبه‌های مختلف زیست‌محیطی ممکن سازد. علاوه‌براین، محاسبه شاخص‌های انرژی به همراه ارزیابی چرخه زندگی، میزان مطلوبیت عملکرد یک محصول در درون مزرعه را نشان می‌دهد. بدین روی، گسترش و توسعه سامانه‌هایی با ورودی انرژی کمتر و بهره‌وری بیشتر، به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بخش کشاورزی می‌انجامد (Dalgaard et al., 2000).

پژوهش‌های بسیاری در زمینه تحلیل انرژی و بررسی چرخه زندگی در کشت برنج انجام شده است. برای نمونه، اثرات زیست‌محیطی تولید برنج ارگانیک با رویکرد چرخه زندگی در ایتالیا مورد مطالعه قرار گرفت (Bacenetti et al., 2016)، پژوهشگران در این مطالعه با بررسی ۱۱ گروه تأثیر مختلف اذعان داشتند که سامانه‌های ارگانیک در کاهش مسمومیت آب‌های شیرین نسبت به سامانه‌های متداول پتانسل بالاتری داشته‌اند. همچنین در مطالعه‌ای آنالیز مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی تولید برنج به‌ویژه انتشارات گازهای گلخانه‌ای (CO_2، N_2O و CH_4) در سامانه‌های متداول برنج و سامانه‌های سازگار با محیط زیست در ژاپن با رویکرد ارزیابی چرخه زندگی نیز مورد بررسی قرار گرفت (Hatcho et al., 2012). در پژوهش دیگر، شاخص‌های اثرات زیست‌محیطی بر مبنای هر تن برنج تولیدی، در سامانه‌های متداول در حدود ده برابر بیش از سامانه‌های ارگانیک در چین بوده است (He et al., 2018). در این پژوهش با بررسی نه گروه تأثیر، پتانسل سمیت انسان و سمیت آب به‌ترتیب در سامانه‌های متداول ۱/۱ kg 1,4-DCB eq و ۳۴۳ kg 1,4-DCB eq گزارش شد که این میزان تقریباً ۵۰ تا ۶۰ برابر بیش‌تر از سامانه‌های ارگانیک تولید برنج بوده است. در مطالعه‌ای بر روی سامانه‌های تولید برنج بر مبنای چرخه زندگی، برتری سازگاری زیست‌محیطی سامانه‌های ارگانیک و پایدار در مقایسه با سامانه‌های متداول برنج گزارش شد (Hokazono et al., 2009). این پژوهشگران نشان دادند که سامانه‌های پایدار و ارگانیک برنج پتانسیل کاهش گرمایش جهانی و یوتریفیکاسیون را دارا می‌باشند.

در پژوهشی خرمدل و همکاران (Khorramdel et al., 2017) با تحلیل اثرات زیست‌محیطی نظام‌های تولید برنج اذعان داشتند بالاترین اثرات زیست‌محیطی نظام‌های تولید برنج به ترتیب مربوط به یوتریفیکاسیون در محیط آبی، گرمایش جهانی، یوتریفیکاسیون در محیط خشکی و اسیدی شدن بوده است.

علاوه‌براین، آقاعلیخانی و همکاران (AghaAlikhani et al., 2013) با بررسی انرژی مصرفی در زراعت برنج در استان مازندران نشان دادند، مقادیر بازده انرژی در سیستم مکانیزه ۱/۶۳ و در سیستم مرسوم ۱/۷۲ بوده است. نبوی پله‌سرائی و همکاران (Nabavi-Pelesaraei et al., 2019) نیز با بررسی مدل‌سازی انرژی و شاخص‌های آلایندگی در تولید شلتوک در استان گیلان بر مبنای رویکرد ارزیابی چرخه زندگی بیان داشتند که پر مصرف‌ترین و به تبع آن پرآلاینده‌ترین نهاده‌های مصرفی شامل سوخت دیزل، کودهای شیمیایی و الکتریسته در این پژوهش می‌باشند. فراهم‌سازی مداوم نیازهای نامحدود مربوط به بخش کشاورزی با به‌کارگیری منابع محدود موجود، درگرو کاربرد منطقی، بهینه و اصولی مؤلفه‌های گوناگون تولید است و این امر مستلزم پژوهش‌های نظام‌مند و چندجانبه‌نگر خواهد بود. با نظر به سطوح زیر کشت قابل ملاحظه‌ی برنج در استان مارندران و به‌کارگیری نهاده‌های کشاورزی (از جمله سموم مختلف، کودهای شیمیایی، سوخت‌های فسیلی) در کاشت، داشت و برداشت این محصول؛ پرواضح است که اثرات زیست محیطی بسیاری بر اکوسیستم این ناحیه می‌گذارند. بنابراین، پژوهش حاضر با هدف بررسی مؤلفه‌های انرژی و تعیین اثرات زیست‌محیطی در سه سامانه زراعی متداول، کم‌نهاده و ارگانیک به‌منظور تصمیم‌گیری‌های مناسب در مدیریت محصول یادشده، طراحی و اجرا شد.

1- Life Cycle Analysis

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، سه سامانه‌ی زراعی شامل کشت مرسوم، کم‌نهاده و ارگانیک کشت برنج (رقم طارم هاشمی) طی سال زراعی ۱۳۹۸ در مناطق مختلف استان مازندران مورد مقایسه قرار گرفت. استان مازندران با حدود ۲۴ هزار کیلومترمربع مساحت در موقعیت جغرافیایی بین ۴۷ دقیقه تا ۳۸ درجه و پنج دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۱۴ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است.

جدول ۱- معادلات و ضرایب مربوط به انتشارات حاصل از کودهای شیمیایی و کودهای دامی (IPCC, 2006)

Table 1- Equations and coefficients related to emissions from chemical fertilizers and farm yard manure

شماره معادله Equation number	معادله Equation	ضریب آلودگی Pollution coefficient
1	$N_2O=[0.01\times kg\ \ N_{Chemical\ fertilizers\ \&\ FYM}]\times\left(\frac{44}{28}\right)$	0.01
2	$N_2O=[0.01\times 0.2\times kg\ \ N_{FYM}]\times\left(\frac{44}{28}\right)$	0.01× 0.2
3	$NH_3=[0.1\times kg\ \ N_{Chemical\ fertilizers}]\times\left(\frac{17}{44}\right)$	0.1
4	$NOx=[kg\ \ N_2O_{Chemical\ fertilizers\ \&\ Soil}]\times\left(\frac{21}{100}\right)$	0.21
5	$NH_3=[0.2\times kg\ \ N_{FYM}]\times\left(\frac{17}{14}\right)$	0.2
6	$N_2O=[0.01\times 0.1\times kg\ \ N_{Chemical\ fertilizers}]\times\left(\frac{44}{28}\right)$	0.01× 0.1

روند ارزیابی چرخه حیات از چهار مرحله تشکیل شده است: تعیین هدف و دامنه[1]، تحلیل سیاهه یا صورت‌برداری از چرخه زندگی[2]، ارزیابی اثرات در چرخه زندگی[3] و تفسیر نتایج[4] (Mostashari-Rad et al., 2021).

در این پژوهش، دروازه مزرعه به‌عنوان مرز سامانه و واحد کارکردی مورد مطالعه برای یک تن شلتوک در نظر گرفته شده است. دامنه مورد نظر در پژوهش حاضر از استخراج مواد اولیه تا مرحله برداشت شلتوک بوده است. سیستم تولید شلتوک دارای دو محصول خروجی شامل دانه‌های شلتوک و کاه است؛ لذا در پژوهش حاضر با توجه به هدف و دامنه مورد بررسی، تخصیص اثرات زیست‌محیطی تنها بر اساس یک خروجی (دانه‌های شلتوک) در مدل ارزیابی چرخه زندگی انجام گرفته است.

به‌منظور جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات موردنیاز از روش ارائه و تکمیل پرسش‌نامه و مصاحبه رو در رو با کشاورزان این مناطق استفاده گردید. برای اجرای آزمایش برای سامانه‌های ارگانیک، کم‌نهاده و مرسوم، مزارعی از سه شهرستان آمل، بابل و فریدونکنار؛ که از مناطق عمده شالی‌زاری استان مازندران هستند، انتخاب شدند. در این پژوهش، وسعت زمین‌های انتخابی، یک هکتار در نظر گرفته شده است. داده‌های مربوط به مزرعه شامل میزان مصرف نهاده‌ها همچون کودهای شیمیایی، سم، سوخت دیزل (حاصل از به‌کارگیری ماشین‌های مختلف کشاورزی)، تعداد کارگرها، ساعات کاری و الکتریسیته (مربوط به پمپ‌های آب) در بخش کاشت، داشت و برداشت، در سامانه‌های گوناگون زراعی برنج، به‌صورت رو در رو از کشاورزان جمع‌آوری گردید. به‌منظور سرشماری یا تعیین اندازه نمونه از روش‌های متداول آماری از جمله روش کوکران (Kizilaslan, 2009) استفاده شد. بر این اساس، حجم نمونه به‌دست آمده از فرمول کوکران (معادله ۷) در حدود ۲۱۲ کشاورز برآورد شد.

$$n=\frac{NS^2t^2}{(N-1)d^2+S^2t^2}$$ معادله (۷)

که در آن، N: اندازه جامعه آماری، t: به‌عنوان ضریب اطمینان قابل قبول، S: برآورد انحراف معیار صفت مورد مطالعه در جامعه، d: دقت احتمالی مطلوب و n: حجم نمونه می‌باشد. گام دوم چرخه زندگی

1- Goal & scope definition
2- Inventory analysis
3- Impact assessment
4- Interpretation

به شناسایی و کمّی‌سازی تمامی منابع مورد استفاده برای تولید محصول مثل انرژی، آب، مواد خام و فرآوری شده و تمامی مواد انتشار یافته به محیط زیست همچون انتشار مواد آلاینده به هوا، خاک، آب و ضایعات ناشی از تولید و مصرف محصول تمرکز دارد. در بخش تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های سامانه، تمام منابع و مقادیری که در تولید محصول مورد نیاز است و تمامی مقادیر آلاینده‌های انتشار یافته به محیط زیست در اثر استفاده از نهاده‌ها، بر مبنای واحد مرجع محاسبه گردید. در پژوهش حاضر، جهت برآورد انتشارات ناشی از احتراق دیزل که خود حاصل راه‌اندازی و کاربرد ماشین‌آلاتی همچون تراکتورها است، از انتشارات پایگاه داده اکواینونت استفاده گردید (Nemecek, et al., 2007). انتشارات حاصل از سایر کودهای شیمیایی و کودهای دامی بر مبنای ضرایب هیئت بین دولتی تغییرات اقلیم برآورد شد که در جدول ۱ فهرستوار آورده شده است. بر این اساس، برخی از ضرایب به‌منظور تبدیل آلاینده‌ها در معادلات ۱ تا ۶ (جدول ۱) ارائه شده است (IPCC, 2006).

در گام سوم اثرات بالقوه ناشی از مصرف منابع محیطی و تولید آلاینده‌ها بر انسان و طبیعت مورد کندوکاو قرار گرفت. هدف از این گام، تفسیر ورودی‌ها و خروجی‌های سامانه تولید است که دارای سه مرحله طبقه‌بندی، نرمال‌سازی و وزن‌دهی است (Brentrup et al., 2004 a). در مرحله طبقه‌بندی هر کدام از مقادیر انتشار یافته به محیط زیست و نیز منابع مورد استفاده در چرخه حیات، به اثر زیست محیطی مربوطه نسبت داده شد. به‌منظور دستیابی به اطلاعات مورد نیاز چرخه زندگی در این پژوهش از روش CML2 baseline استفاده شد. مهم‌ترین گروه‌های تأثیر در این تحقیق در روش CML2 baseline شامل تخلیه مواد غیرزیستی، اسیدی شدن، گرمایش جهانی، تخلیه لایه ازن، اکسیداسیون فتوشیمیایی، مسمومیت انسان-ها، مسمومیت آب‌های سطحی، مسمومیت آب‌های آزاد، مسمومیت خاک و یوتریفیکاسیون می‌باشند. در این مرحله پس از طبقه‌بندی اثرات، شاخص هر گروه تأثیر، محاسبه شد. شاخص هر گروه اثر با استفاده از معادله ۸ به‌دست آمد.

$$ICI_i = \sum_i [(E_j or R_j) \times CF_{i,j}] \qquad (۸) \text{ معادله}$$

که در آن، LCI_i: شاخص طبقه‌بندی هر گروه اثر i، E_j یا R_j: انتشار ترکیب j یا مصرف منبع j برای هر واحد کارکردی و CF_{ij}: فاکتور طبقه‌بندی برای ترکیب j سهیم در گروه اثر i می‌باشد. در آخرین مرحله نیز شاخص محیطی تحت عنوان شاخص بوم‌شناخت که معیار نهایی LCA است، با استفاده از معادله ۹ محاسبه شد. درحقیقت، شاخص زیست‌محیطی هر گروه اثر نشان‌دهنده میزان تخریب آن گروه خواهد بود (Brentrup et al., 2004 a):

$$EcoX = \sum_i [N_i \times WF_i] \qquad (۹) \text{ معادله}$$

که در آن، Ecox: شاخص زیست‌محیطی واحد کارکردی برای اثرات زیست‌محیطی، N: نتایج نرمال‌سازی برای گروه اثر i در هر واحد کارکردی و WF_i: فاکتور وزن‌دهی برای هر گروه تأثیر i می‌باشد. باید اذعان داشت هر چه شاخص زیست‌محیطی بزرگ تر باشد، نشان‌دهنده پتانسیل بیشتر در آسیب به محیط زیست خواهد بود. در گام نهایی ارزیابی چرخه زندگی نیز نتایج مراحل صورت‌برداری و ارزیابی تأثیر، مورد تحلیل و گزارش LCA تهیه گردید (ISO, 1997).

به‌منظور محاسبه هم‌ارز انرژی نهاده‌ها و در نهایت، محاسبه انرژی مصرفی در عملیات مختلف از ضرایب و هم‌ارزهای منابع موجود در جدول ۲ استفاده شد.

روابط مربوط به محاسبات شاخص‌های انرژی برای کشت برنج در سناریوهای مختلف در جدول ۳ آورده شده است. این پارامترها عبارتند از بازده انرژی، انرژی خالص، بهره‌وری انرژی و انرژی مخصوص.

در این پژوهش، تمامی شاخص‌های انتشار آلاینده‌های زیست-محیطی با استفاده از مدل LCA در نرم‌افزار SimaPro برآورد و مقایسه شدند. نمودارها نیز با نرم‌افزار Excel ترسیم شده است.

نتایج و بحث

انرژی‌های ورودی و خروجی مربوط به سامانه‌های مختلف زراعت برنج در مناطق مورد مطالعه و مقدار عملکرد هر یک از این سامانه‌ها در هر هکتار در جدول ۴ ارائه شده است. بر این اساس، به‌ازای تولید ۴۶۱۴/۸۴ کیلوگرم شلتوک در یک هکتار در سامانه‌های متداول، ۶۰۲۲۵/۴۲ مگاژول انرژی مصرف شده و این میزان انرژی به‌تولید ۶۷۸۳۸/۱۵ مگاژول انرژی در این سامانه منجر شده است. علاوه براین، به ازای تولید ۴۱۱۵/۸۹ و ۳۲۶۵/۶۳ کیلوگرم شلتوک در هر هکتار از سامانه‌های کم‌نهاده و ارگانیک نیز به‌ترتیب ۶۰۵۰۳/۵۸ و ۴۸۰۰۴/۷۶ مگاژول انرژی تولید شده است، به‌طوری که این میزان تولید، به مصرف ۳۳۸۵۸/۲۲ و ۱۸۶۶۲/۱۴ مگاژول انرژی در سامانه کم‌نهاده و ارگانیک منجر شده است. ازآن جا که برنج در نقاط

گوناگون جهان با تکنیک و روش‌های متنوعی تولید مـی‌گـردد و نیـز ارقام گوناگون آن دارای عملکرد متنوعی است، گزارش‌های مختلفـی در مورد مقدار انرژی تولیدی و مصرفی در تولید برنج ارائه شده اسـت. برای نمونه، پنگ و یان (Peng & Yuan, 2017) در مطالعـات خـود روی برنج مقادیر انرژی را در تولیـد بـرنج در سـامانه‌هـای گونـاگون کاشت در هر هکتار در حدود ۲۵۴۴۱ تا ۳۴۵۵۵ مگاژول برآورد کردند. همچنین مقدار انـرژی تولیـدی در هـر هکتـار از ۲۳۴۳۹۳ تـا حـدود ۲۶۶۷۴۵ مگاژول متغیر بوده است.

جدول ۲- هم‌ارز انرژی مربوط به نهاده‌های مصرفی
Table 2- Energy equivalent of consumption inputs

ورودی‌ها و خروجی‌ها Inputs and outputs	واحد مصرف Unit	معادل انرژی Energy equivalent (MJ per unit)	منبع Reference
ورودی‌ها .۱ Inputs			
بذر Seed	kg	14.7	Kazemi et al. (2015)
کود شیمیایی Chemical fertilizer	kg		
نیتروژن N		66.14	Banaeian & Zangeneh (2011)
فسفر P		12.44	Ozkan et al. (2011)
پتاسیم K		11.15	Nabavi-Pelesaraei et al. (2018)
مواد شیمیایی Agrochemicals	kg		
علف‌کش Herbicide		238	Banaeian & Zangeneh (2011)
قارچ‌کش Fungicide		216	Banaeian & Zangeneh (2011)
حشره‌کش Pesticide		101.2	Banaeian & Zangeneh (2011)
دیزل Diesel	L	56.31	Erdal et al. (2007)
ادوات و ماشین‌آلات Agricultural machinery	$MJ.kg^{-1}$		
تراکتور Tractor		93.6	Ovtit-Canavate & Hernanz (1999)
نشاکار Transplanter		51.5	Salami & Ahmadi (2010)
اسپری Sprayer		62.7	Ovtit-Canavate & Hernanz (1999)
کمباین Combine		87.63	Ovtit-Canavate & Hernanz (1999)
نیروی برق Electricity	KWh	11.93	Nassiri & Singh (2009)
نیروی انسانی Human labor	h	1.96	Nabavi-Pelesaraei et al. (2018)
خروجی‌ها .۲ Outputs			
شلتوک Paddy	kg	14.7	Kazemi et al. (2015)

کاه و کلش Straw	kg	12.5	Kazemi et al. (2015)

جدول ۳- شاخص‌های انرژی

Table 3- Energy parameters

شاخص Index	شماره Number	معادله Equation	منبع Reference
نسبت یا کارایی مصرف انرژی Energy ratio (%)	(10)	$ER = \frac{Energy\ Output}{Energy\ Input}$	Nabavi-Pelesaraei et al. (2018)
انرژی خالص Net energy gain	(11)	$NE = \text{Energy output} - \text{Energy Input}$	Nabavi-Pelesaraei et al. (2018)
بهره‌وری انرژی Energy productivity	(12)	$EP = \frac{Grain\ Output}{Energy\ Input}$	Nabavi-Pelesaraei et al. (2018)
انرژی ویژه Specific energy	(13)	$SE = \frac{Energy\ Input}{Grain\ Output}$	Nabavi-Pelesaraei et al. (2018)

علت تولید بالای انرژی در سامانه‌های برنج در این پژوهش در مقایسه با پژوهش حاضر را می‌توان تولید بیشتر عملکرد برنج در حدود ۸۴۵۱ تا ۹۱۷۳ کیلوگرم در هکتار دانست. در پژوهشی دیگر، مقادیر انرژی ورودی در تولید برنج به‌ازای هر هکتار از شالی‌زارهای برنج در حدود ۱۹۹۳۷۳ تا ۲۲۱۲۲۲ مگاژول بوده است. در این مطالعه، میزان انرژی تولیدی در حدود ۷۴۵۲۶ مگاژول در کشور ویتنام برآورد شده است (Truong et al., 2017). پیشگرکومله و همکاران (Pishgar-Komleh et al., 2011) در پژوهش خود روی برنج اظهار داشتند میزان انرژی ورودی و خروجی به‌ترتیب ۳۹۳۳۳ و ۶۰۳۴۱ مگاژول در هکتار بوده است. در پژوهشی دیگر نیز میزان انرژی‌های ورودی و خروجی در سامانه تولید برنج در ایران به‌ترتیب در حدود ۷۱۰۹۲/۲۶ و ۱۲۲۹۶۲/۷۶ مگاژول در هکتار برآورد شده است (AghaAlikhani et al., 2013). مقدار کل انرژی ورودی حاصل از سموم شیمیایی نیز در سامانه‌های متداول و کم‌نهاده به‌ترتیب ۶۸۲۰/۸۰ و ۲۲۷۰/۴۰ ثبت شد. در سامانه‌های ارگانیک به‌دلیل عدم استفاده از سموم شیمیایی و به‌کارگیری عملیات مطلوب کشاورزی مانند کاربرد مناسب کودها و سموم شیمیایی، بذور و نیروی انسانی مقدار انرژی ورودی در مقایسه با سایر سامانه‌ها کمتر و در نتیجه، کارایی تولید برنج بیشتر است (Chauhan et al., 2006).

شکل ۱ سهم هرکدام از نهاده‌ها را در تولید شلتوک در سامانه متداول نشان می‌دهد. بالاترین مقدار مصرف انرژی به سوخت دیزل با ۴۳/۳۷ درصد از کل میزان انرژی مصرفی تعلق دارد.

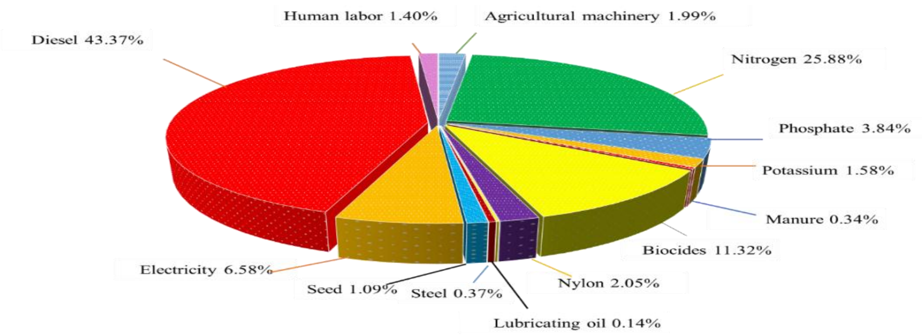
همچنین شکل‌های ۲ و ۳ نیز سهم نهاده‌ها را در سامانه‌های کم‌نهاده و ارگانیک ارائه می‌دهند، که در آن‌ها به‌ترتیب سوخت دیزل با ۴۴/۳۱ و ۶۲/۸۹ درصد از کل انرژی مصرفی بیشترین مقدار مصرف انرژی را به‌خود اختصاص داده است. به‌طور مشابهی، در پژوهش‌های بسیاری در زمینه تولید برنج، سوخت دیزل سهم بسزایی در مصرف کل انرژی داشته است (Eskandari et al., 2011; Bockari-Gevao et al., 2005; Bautista et al., 2010). یکی از مهم ترین دلایل مصرف بالای سوخت دیزل در ایران را می‌توان استفاده بیش از حد از ماشین‌ها و ادوات قدیمی با طول عمر بالا برشمرد. بدین روی، اجرای عملیاتی که به کارایی مصرف دیزل به‌ویژه مصرف دیزل به‌منظور سوخت تیلر و تراکتور می‌شود؛ برای نمونه پر کردن باک قبل از شروع کار، امتحان فشار باد لاستیک، سرویس و نگهداری به‌موقع و به‌کارگیری روغن با ویسکوزیته مطلوب جهت افزایش کارایی موتور توصیه می‌شود. در پژوهشی مشابه نیز در شالی زارهای کشور هند، بیشتر از ۵۰ درصد مصرف انرژی به مصرف سوخت دیزل متعلق بوده است (Baruah & Dutta, 2007). همچنین، پیشگرکومله و همکاران (Pishgar-Komleh et al., 2011) نیز با بررسی انرژی مصرفی در تولید برنج شمال ایران، اذعان داشتند که بیشترین سهم در کل انرژی مصرفی به صورت مصرف انرژی به شکل دیزل، بنزین، گاز و الکتریسیته بوده است. در همین زمینه، کاظمی و همکاران (Kazemi et al., 2015) نیز در شالی زارهای استان گیلان، مازندران و گلستان نشان دادند که سوخت دیزل به‌ترتیب در حدود ۲۹/۶۷، ۳۵/۶۵ و ۴۶/۴۱ درصد از میزان کل انرژی مصرفی را به خویش اختصاص داده است. از سویی، در سامانه

ارگانیک انرژی مصرفی بـه صـورت الکتریسـیته بـا ۱۳/۱۹ درصـد در جایگاه دوم قرار گرفت این درحالی است که انـرژی بـه صـورت کـود نیتروژن با ۲۵/۸۸ و ۲۰/۲۵ درصد از کل انرژی مصرفی به ترتیـب در سامانه‌های متداول و کم‌نهاده در جایگاه نخست قرار گرفت.

جدول ٤- انرژی‌های ورودی و خروجی در تولید شلتوک در سامانه‌های مختلف تولید برنج در استان مازندران

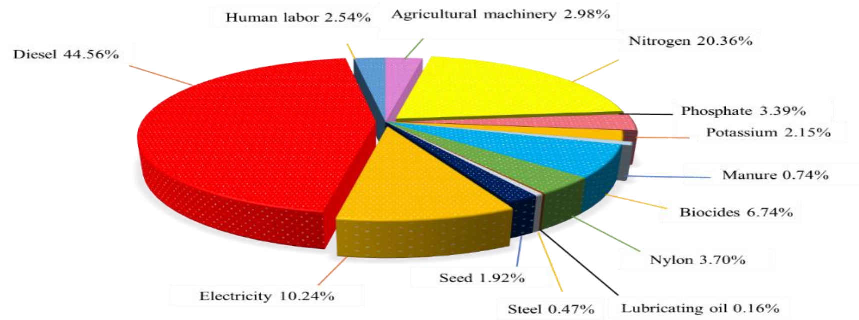
Table 4- Input and output energies in paddy production in different rice production systems in Mazandaran province

ورودی-خروجی Input-output	ارگانیک Organic system		کم‌نهاده Low external input system		متداول Conventional system	
	معادل انرژی Energy equivalent ($MJ.ha^{-1}$)	کمیت در واحد سطح Quantity per unit area (ha)	معادل انرژی Energy equivalent ($MJ.ha^{-1}$)	کمیت در واحد سطح Quantity per unit area (ha)	معادل انرژی Energy equivalent ($MJ.ha^{-1}$)	کمیت در واحد سطح Quantity per unit area (ha)
ورودی‌ها .۱ **Inputs**						
ماشین‌آلات Agricultural machinery (kg)	941.82	6.60	1004.61	7.04	1195.83	8.38
نیتروژن N (kg)	-	-	6857.40	103.68	15588.54	235.69
فسفات P (kg)	-	-	1144.23	91.98	2318.19	186.35
پتاسیم K (kg)	-	-	725.42	65.06	953.66	85.53
کود دامی Farm yard manure (kg)	450	1500	249.13	830.43	206.68	688.92
سموم شیمیایی Biocides (kg)	-	-	2270.40	18.92	6820.80	56.84
نایلون Nylon (kg)	1214.10	13.49	1246.50	13.85	1236.60	13.74
روغن Oil (liter)	51.87	1.33	56.94	1.46	90.09	2.31
فولاد Steel (kg)	146.80	4	161.48	4.40	227.17	6.19
بذر Seed (kg)	645.92	43.94	646.51	43.98	659.44	44.86
الکتریسیته Electricity (KWh)	2462.11	206.38	3447.77	289	3962.91	332.18
نیروی کار Human labor (Hour)	1012.83	516.75	853.95	435.59	843.31	430.26
دیزل Diesel (Liter)	11736.69	208.43	15002.67	266.43	26122.21	463.90
خروجی‌ها .۲ **Outputs**						
شلتوک Paddy	48004.76	3265.63	60503.58	4115.89	67838.15	4614.84



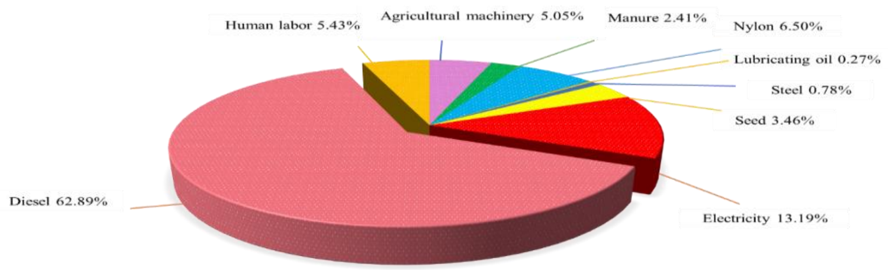
شکل ۱- سهم هر یک از نهاده‌ها در کل انرژی مصرفی در تولید شلتوک در سامانه متداول در استان مازندران

Fig. 1- The share of each input in the total energy consumption in the production of paddy in the conventional system in Mazandaran province



شکل ۲- سهم هر یک از نهاده‌ها در کل انرژی مصرفی در تولید شلتوک در سامانه کم‌نهاده در استان مازندران

Fig. 2- The share of each input in the total energy consumption in the production of paddy in the low input system in Mazandaran province



شکل ۳- سهم هر یک از نهاده‌ها در کل انرژی مصرفی در تولید شلتوک در سامانه ارگانیک در استان مازندران

Fig. 3- The share of each input in the total energy consumption in the production of paddy in the organic system in Mazandaran province

علاوه‌براین، سهم کود نیتروژنه در تولید شلتوک در سامانه‌های متداول و کم‌نهاده به‌ترتیب در حدود ۲۵/۸۸ و ۲۰/۳۶ درصد از کل میزان انرژی مصرفی بوده است که در جایگاه دوم قرار گرفتند (شکل ۱ و ۲). این در حالی است که در نظام ارگانیک میزان انرژی ورودی الکتریسیته با ۱۳/۱۹ درصد در جایگاه دوم قرار گرفت (شکل ۳).

نتایج این پژوهش با نتایج برخی از پژوهش‌های دیگر در مورد تولید برنج مطابقت دارد (Bockari-Eskandari et al., 2011; Gevao et al., 2005; Khan et al., 2009; Gajaseni et al., 1995; Bautista et al., 2010) که در آن‌ها کودهای شیمیایی مصارف بسیار بالایی در تولید شلتوک داشته‌اند. به‌دلیل شرایط کاشت برنج و نیز موقعیت جغرافیایی استان مازندران، آب‌شویی کودهای شیمیایی امری اجتناب‌ناپذیر است و همین امر به افزایش مصرف کودهای شیمیایی می‌شود. با این وجود، رعایت برخی از اصول مدیریتی در این حیطه مانند مقدار صحیح مصرف کود نیتروژنه طبق دستورالعمل های فنی، به‌کارگیری کودها با فرمول‌بندی مناسب، کاربرد صحیح و زمان‌بندی مناسب را می‌توان جهت اصلاح مصرف کود نیتروژن به‌کار برد.

علاوه‌براین، مؤلفه‌های انرژی در تولید شلتوک در جدول ۴ آورده شده است. بر این اساس، میزان نسبت انرژی در تولید شلتوک در سامانه‌های متداول، کم‌نهاده و ارگانیک به‌ترتیب ۱/۱۳، ۱/۷۹ و۲/۵۷ بوده است. متوسط نسبت انرژی در مطالعات گوناگون روی برنج از ۱/۷۲ (AghaAlikhani et al., 2013)، ۳ (Eskandari et al., 2011)، ۴ (Chamsing et al., 2006) و ۱/۵۳ (Pishgar-Komleh et al., 2011) متغیر بوده است. در پژوهشی در شالی‌زارهای کشور چین نسبت انرژی بین ۷/۷۲ و ۹/۲۱ گزارش شده است (Yuan & Peng, 2017). در شالی‌زارهای کشور ویتنام نیز این نسبت بین ۶/۰۸ و ۸/۹۶ متغیر بوده است (Truong et al., 2017). این درحالی است که نسبت انرژی در پژوهشی در شالی‌زارهای جنوب ایران بین ۲/۳۰ و ۲/۸۵ گزارش شده است (Eskandari & Attar, 2015). مقایسه این نتایج حاکی از آن است که می‌توان این نسبت را در شالی‌زارهای مورد مطالعه با افزایش در کارایی انرژی به کمک اصلاح ارقام مورد استفاده، مدیریت و کاهش به کارگیری از نهاده‌های انرژی، افزایش انرژی خروجی و بهینه‌سازی الگوی مصرف انرژی ارتقا بخشید. از سویی، میزان بهره‌وری انرژی نیز در سامانه‌های متداول، کم نهاده و ارگانیک به‌ترتیب در حدود ۰/۰۸، ۰/۱۲ و ۰/۱۷ برآورد شد. این امر حکایت از آن دارد که به‌ازای تولید هر یک کیلوگرم شلتوک در سامانه‌های متداول، کم‌نهاده و ارگانیک به‌ترتیب ۱۳/۰۵، ۸/۲۳ و ۵/۷۱ مگاژول بر کیلوگرم (انرژی ویژه) مصرف شده است. برخی از پژوهش‌ها حاکی از آن است که بهره‌وری انرژی در شالی زارهای کشور چین در حدود ۰/۲۷ و ۰/۳۳ کیلوگرم بر مگاژول بوده است و نیز در شالی‌زارهای کشور ویتنام نیز در حدود ۰/۱۵ و ۰/۲۳ کیلوگرم بر مگاژول برآورد شده است (Yuan & Peng, 2017; Truong et al., 2017). همچنین در سامانه متداول در حدود ۷۶۱۲/۷۲ مگاژول در هکتار و برای سامانه‌های کم نهاده و ارگانیک میزان انرژی خالص به‌ترتیب در حدود ۲۶۶۴۵/۳۶ و ۲۹۳۴۲/۶۲ مگاژول در هکتار بوده است. این یافته‌ها بیانگر مقادیر انرژی خروجی بسیار بالاتر از مقادیر انرژی ورودی در این سامانه‌ها است. در حقیقت، مقادیر بالا و مثبت انرژی خالص نشان‌دهنده این واقعیت است که توازن انرژی در بوم-نظام‌های زراعی مورد مطالعه مثبت است (Yousefi et al., 2017).

تقسیم‌بندی دیگری از انرژی‌های ورودی ازجمله انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی‌های تجدیدناپذیر، انرژی‌های مستقیم و انرژی‌های غیرمستقیم وجود دارد که در این پژوهش مقادیر آن‌ها نیز برای سامانه‌های مذکور برآورد گردیده است (جدول ۵). بر اساس این نتایج، سهم انرژی‌های تجدیدناپذیر در مقایسه با انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار بیشتر است. بر این اساس، نتایج نشان داد که مقادیر انرژی مستقیم و غیرمستقیم در سامانه متداول به‌ترتیب ۳۰۹۲۸/۴۳ و ۲۹۲۹۷/۰۰ مگاژول بر هکتار بوده است. علاوه‌براین، سهم انرژی تجدیدناپذیر در سامانه متداول ۵۸۵۱۶/۰۰ مگاژول بر هکتار و در سامانه کم نهاده ۳۱۹۱۷/۴۲ مگاژول بر هکتار بوده است، این در حالی است که این سهم در سامانه‌های ارگانیک بسیار کمتر در حدود ۱۶۵۳۳/۴۰ مگاژول بر هکتار بوده است. البته سهم انرژی‌های تجدیدپذیر نیز در سامانه‌های ارگانیک در مقایسه با دیگر سامانه‌ها بسیار بالاتر بوده است، به‌طوری که این سهم در سامانه‌های ارگانیک در حدود ۲۱۰۸/۷۵ مگاژول در هکتار و در سامانه‌های متداول و کم نهاده به‌ترتیب در حدود ۱۷۰۹/۴۳ و ۱۷۴۹/۵۹ بوده است. این نتایج حکایت از آن دارد که تولید برنج به مقادیر بسیار بالای منابع تجدیدناپذیر مانند سوخت دیزل و الکتریسته وابسته است. به‌طور مشابهی، یوسفی و محمدی (Yousefi & Mohammadi, 2011) خاطر نشان کردند که مصرف بسیار بالای انرژی‌های تجدیدناپذیر ناشی از کاربرد زیاد کودهای شیمیایی، سوخت دیزل و ماشین‌آلات در تولید است. بسیاری از پژوهش‌ها نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند که سهم انرژی‌های تجدیدناپذیر بسیار بالاتر از سهم انرژی‌های تجدیدپذیر بوده است (Esengun et al., Ozkan et al., 2007; 2007). همچنین، در پژوهش حاضر مقادیر انرژی مستقیم و غیرمستقیم در سامانه ارگانیک ۸۱/۵۱ درصد و ۱۸/۴۹ درصد، در سامانه کم نهاده به‌ترتیب ۵۷/۳۴ و ۴۲/۶۶ درصد و در سامانه متداول به‌میزان ۵۱/۳۵ و ۴۸/۶۵ درصد به‌دست آمد. علاوه براین سهم مقادیر انرژی‌های تجدیدناپذیر نیز در سامانه‌های متداول، کم‌نهاده و ارگانیک به‌ترتیب در حدود ۹۷/۱۶، ۹۴/۸۰ و ۸۸/۷۰ درصد برآورد شد. لذا با توجه به این نتایج، مقادیر به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدناپذیر در سامانه‌های متداول و کم نهاده در مقایسه با سامانه ارگانیک بیشتر است که از دو دیدگاه قابل بررسی است. نخست آن که در این منطقه می‌بایست لزوم توجه هر چه بیشتر به انرژی‌های تجدیدپذیر در اولویت قرار بگیرد. دیدگاه دوم نیز دربرگیرنده مباحث محیط زیست است که کاربرد نادرست و بی‌رویه انرژی‌های تجدیدناپذیر ازجمله سوخت فسیلی می‌تواند تبعات و مخاطرات زیست‌محیطی غیرقابل جبرانی را در پی داشته باشد.

جدول ۵- مؤلفه‌های انرژی در سامانه تولید شلتوک در استان مازندران

Table 5- Energy parameters in paddy rice production systems in Mazandaran province

مؤلفه‌های انرژی Energy parameters	واحد Unit	ارگانیک Organic	کم‌نهاده Low input	متداول Conventional
مقدار کل انرژی ورودی Total input energy	$MJ.ha^{-1}$	18662.14	33858.22	60225.42
مقدار کل انرژی خروجی Total output energy	$MJ.ha^{-1}$	48004.76	60503.58	67838.15
نسبت انرژی Energy ratio	-	2.57	1.79	1.13
بهره‌وری انرژی Energy productivity	$kg.MJ^{-1}$	0.17	0.12	0.08
انرژی ویژه Specific energy	$MJ.kg^{-1}$	5.71	8.23	13.05
انرژی خالص Net energy gain	$MJ.ha^{-1}$	29342.62	26645.36	7612.72
انرژی مستقیم (دیزل، نیروی کار و الکتریسیته) Direct energy (diesel, labor and electricity)	$MJ.ha^{-1}$	15211.64	19304.40	30928.43
انرژی غیرمستقیم (بذر، کودهای شیمیایی، سموم، کود دامی و ماشین) Indirect energy (seed, chemical fertilizers, pesticides, manure and machinery)	$MJ.ha^{-1}$	3450.51	14362.61	29297.00
انرژی تجدیدپذیر (بذر، کود دامی و نیروی کار) Renewable energy (seeds, manure and labor)	$MJ.ha^{-1}$	2108.75	1749.59	1709.43
انرژی تجدیدناپذیر (دیزل، سموم و کود شیمیایی، ماشین، الکتریسیته) Non-renewable energy (diesel, pesticides and chemical fertilizers, machinery, electricity)	$MJ.ha^{-1}$	16553.40	31917.42	58516.00

همچنین، بررسی چرخه زندگی برنج از مرحله استخراج مواد اولیه تا برداشت شلتوک به‌منظور بررسی‌های زیست محیطی تولید شلتوک در سامانه‌های مختلف برنج، انجام گرفت. جدول ۶ محاسبات حاصل را بر مبنای استاندارد CML2 baseline بر اساس یک تن تولید شلتوک ارائه می‌دهد.

گرمایش جهانی از جمله مهم‌ترین گروه‌های تأثیر زیست‌محیطی در مطالعه‌های چرخه زندگی به‌شمار می‌رود. بر اساس نتایج این پژوهش، به‌ازای تولید هر تن شلتوک در سامانه‌های متداول، کم‌نهاده و ارگانیک به‌ترتیب در حدود ۲۴۰۸/۹۰، ۱۷۷۷/۸۵ و ۱۱۹۳/۷۹ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن معادل به اتمسفر انتشار می‌یابد. در پژوهشی، مقدار گرمایش جهانی برای هر تن برنج در شالی‌زار کشورهای مدیترانه‌ای برای سه فصل زراعی و پنج روش گوناگون تولید برنج تخمین زده شد. یافته‌های این پژوهش حاکی از آن بود که در سال ۲۰۱۱ مقدار گرمایش جهانی حاصل از تولید یک تن برنج در بین ۱۸۴۰ تا ۵۸۸۱ کیلوگرم کربن دی اکسید معادل، و در سال ۲۰۱۲ حدود ۱۰۹۰ و ۳۰۰۱ کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل و در سال ۲۰۱۳ در حدود ۹۳۳ و ۲۷۶۰ کیلوگرم دی اکسید کربن معادل بوده است (Fangueiro et al., 2017). همچنین، در پژوهشی دیگر در مزارع برنج واقع در شمال تایلند، مقدار گرمایش جهانی حاصل از تولید یک تن برنج در حدود ۵۸۰ کیلوگرم دی‌اکسید کربن معادل بوده است (Yodkhum et al., 2017). شکل ۴، ۵ و ۶ نیز سهم هرکدام از نهاده‌ها را در میزان گرمایش و دیگر گروه‌های تأثیر را در روش

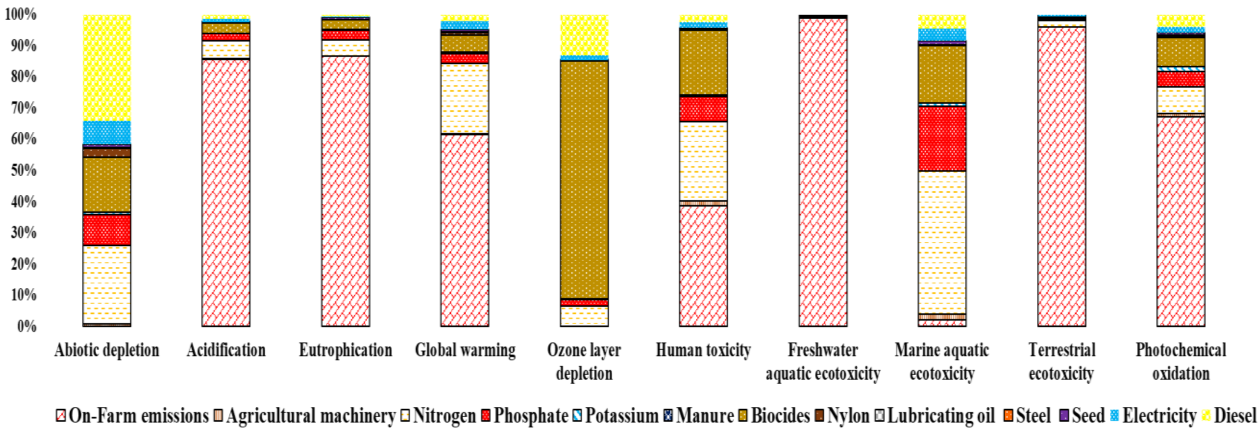
CML2 baseline به‌ترتیب در سامانه‌های متداول، کم‌نهاده و ارگانیک نشان می‌دهد. بر اساس یافته‌ها، آلاینده‌های درون مزرعه‌ای در هر سه سامانه مورد مطالعه سهم اصلی را در ایجاد گرمایش داشته‌اند. منشأ این نوع آلایندگی‌ها احتراق دیزل مصرفی در ادوات کشاورزی و ماشین آلات و نیز انتشار دی‌اکسید نیتروژن، اکسیدهای نیتروژن‌دار و دیگر ترکیبات نیتروژن‌دار حاصل از مصرف کود نیتروژن می‌باشند.

جدول ٦- شاخص‌های ارزیابی چرخه زندگی در سامانه‌های تولید شلتوک در استان مازندران بر مبنای استاندارد CML2 baseline

Table 6- Impact categories of life cycle assessment in Mazandaran paddy rice systems based upon CML2 baseline

گروه‌های تأثیر Impact categories	واحد Unit	ارگانیک Organic	کم‌نهاده Low input	متداول Conventional
تخلیه مواد غیرزیستی Abiotic depletion	kg Sb eq*	2.25	3.87	6.45
اسیدی شدن Acidification	kg SO_2 eq	24.25	32.44	39.37
یوتریفیکاسیون Eutrophication	kg PO_4^{-3} eq	6.41	9.13	11.46
گرمایش جهانی Global warming	kg CO_2 eq	1193.79	1777.85	2408.90
تخلیه لایه ازن Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	0.00004	0.0009	0.0004
مسمومیت انسان‌ها Human toxicity	kg 1,4-DCB eq**	272.83	651.20	1151.11
مسمومیت آب‌های سطحی Freshwater aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DCB eq	56.19	15017.06	22985.92
مسمومیت آب‌های آزاد Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DCB eq	55235.26	241137.62	446796.91
مسمومیت خاک Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB eq	5.79	84.97	136.99
اکسیداسیون فتوشیمیایی Photochemical oxidation	kg C_2H_4 eq	0.48	0.70	0.79

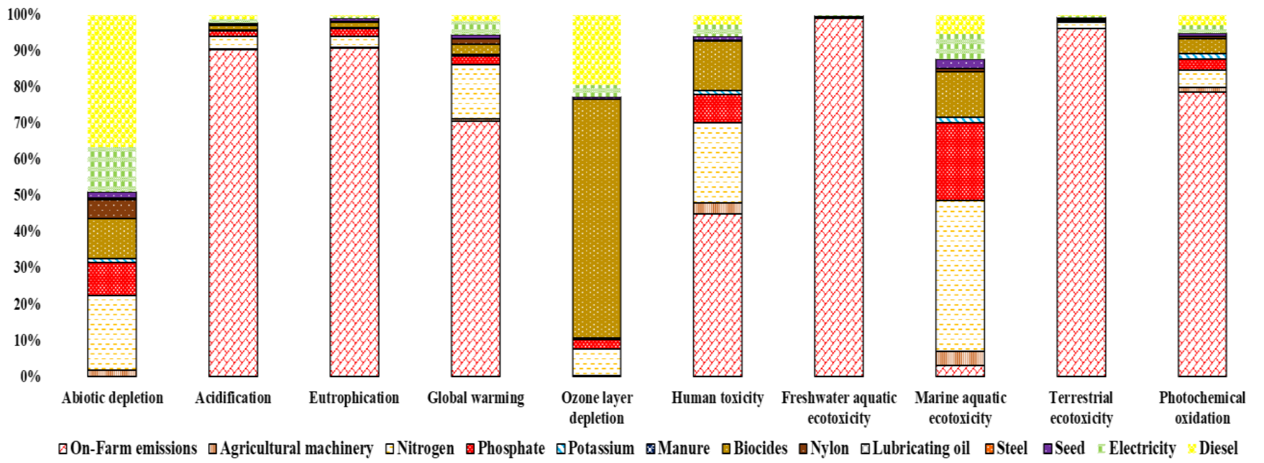
* kg Sb eq: معادل آنتیموان (Antimony) به‌ازای کیلوگرم انتشار، ** kg 1,4-DCB eq: معادل دیکلروبنزن (1,4-Dichlorobenzene) به‌ازای کیلوگرم انتشار



شکل ٤- سهم هر یک از نهاده‌های مصرفی و انتشارات درون مزرعه‌ای در گروه‌های تأثیر آلاینده‌های زیست‌محیطی در سامانه متداول تولید شلتوک در استان مازندران

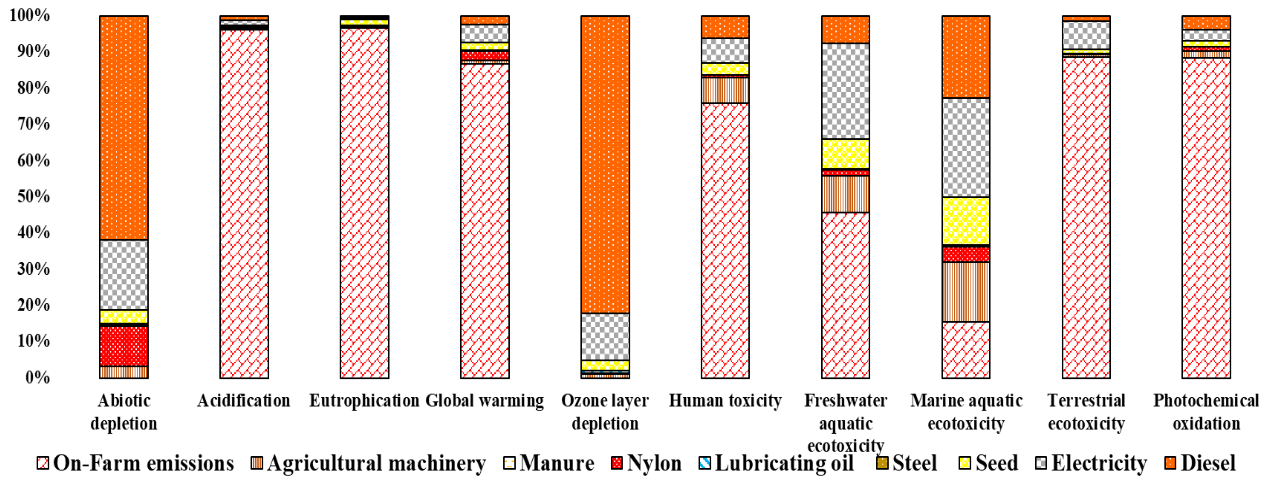
Fig. 4- Share of each input and on-farm emissions in the environmental pollutants impact categories in the conventional paddy production system in Mazandaran province

در پژوهشی در شالی زارهای کشور چین، در حدود ۸۰ درصد از میزان کل انتشار گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر حاصل از فعالیت‌های مستقیم در مزرعه بود (Xu et al., 2013). همچنین این فعالیت‌های مستقیم درون مزرعه‌ای در حدود ۸۳ درصد از کل گازهای گلخانه‌ای را در شالی‌زارهای کشور تایلند (Yodkhum et al., 2017) و حدود ۷۷ درصد از کل گازهای گلخانه‌ای را در شالی زارهای شمال کشور ژاپن (Koga & Tajima, 2011) به خود اختصاص دادند.



شکل ۵- سهم هر یک از نهاده‌های مصرفی و انتشارات درون مزرعه‌ای در گروه‌های تأثیر آلاینده‌های زیست‌محیطی در سامانه کم‌نهاده تولید شلتوک در استان مازندران

Fig. 5- Share of each input and on-farm emissions in the environmental pollutants impact categories in the low input paddy production system in Mazandaran province



شکل ٦- سهم هر یک از نهاده‌های مصرفی و انتشارات درون مزرعه‌ای در گروه‌های تأثیر آلاینده‌های زیست‌محیطی در سامانه ارگانیک تولید شلتوک در استان مازندران

Fig. 6- Share of each input and on-farm emissions in the environmental pollutants impact categories in the organic paddy production system in Mazandaran province

برخی از گازهای اسیدی انتشاریافته مانند دی‌اکسید سولفور و اکسیدهای نیتروژن که عمدتاً از سوختن سوخت‌های فسیلی انتشار می‌یابند، قادرند تا چندین روز در هوا باقی بمانند. لذا این گازها قادرند تا مسافت هزاران کیلومتر حرکت کنند و در صورت برخورد با دیگر

مواد به اسیدهای شیمیایی مانند نیتریک و سولفوریک تبدیل گردند، به‌طوری‌که در نهایت، این پدیده به‌بروز پدیده اسیدی شدن منجر می‌شود (Steiner et al., 2003). با توجه به جدول ۴-۳ مقادیر شاخص اسیدی‌سازی برای تولید برنج در سامانه‌های متداول، کم‌نهاده و ارگانیک به‌ترتیب ۳۷۰/۱۴، ۳۱۹/۹۸ و ۲۴۷/۰۷ کیلوگرم دی‌اکسید سولفور معادل به‌ازای تولید هر تن شلتوک است، به‌طوری‌که انتشارات درون مزرعه‌ای مستقیم با سهمی در حدود بیش از ۸۰ درصد در هر سه سامانه مورد بررسی، دارای مهم‌ترین نقش در تولید این شاخص بوده است. در پژوهشی در کشور چین، مقدار شاخص اسیدی سازی در تولید هر تن شلتوک در حدود ۵۲/۲۶ کیلوگرم دی اکسید سولفور معادل برآورد شد (He et al., 2018). این میزان از تفاوت‌ها را می-توان ناشی از انواع مختلف عملیات کشاورزی، نوع محصول خروجی (کل شلتوک یا دانه) و یا نوع کود مصرفی دانست.

پدیده یوتریفیکاسیون نیز واکنش سامانه‌ها به افزایش بیش از حد مواد مصنوعی و یا طبیعی در محیط آبی است. چنین موادی می‌توانند در قالب مواد مغذی برای موجودات زنده مانند نیترات، هومین‌ها و فسفات باشند که قادرند از سوی کودهای شیمیایی و یا پساب حاصل از آن‌ها وارد آب‌ها شوند. این شاخص بر مبنای روش استوکیومتریک و در واحد کیلوگرم معادل فسفات بیان می‌گردد (Heijungs, 1992). شکل ۴، ۵ و ۶ نشان دهنده آن است که در تولید شلتوک در هر سه سامانه مورد بررسی انتشارات حاصل از فعالیت‌های مزرعه‌ای (مانند واکنش‌های ناشی از کودهای شیمیایی و احتراق دیزل) در بیش از ۸۰ درصد از میزان کل این شاخص سهم داشته‌اند. به‌طور مشابهی، (Hokazono & Hayashi 2012) سهم انتشارات مستقیم را در شاخص یوتریفیکاسیون در حدود ۷۷ تا ۸۸ درصد برآورد کرده‌اند. با توجه به شکل ۴، ۵ و ۶ تولید سموم (خارج از مزرعه) در تخلیه لایه ازن و شاخص‌های مرتبط با سمیت نیز نقش پررنگی داشته‌اند. علی رغم آن که آسیب‌های زیست محیطی حاصل از تولید سموم شیمیایی در محدوده کار شالیکاران نیست، با این وجود، کشاورزان می‌توانند با بهینه‌سازی مصرف سموم شیمیایی به کاهش تولید سموم کمک کرده و مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از آن‌ها را به حداقل برسانند. علاوه‌براین، استخراج، فراوری و توزیع سوخت نیز عامل اساسی در گروه‌های تأثیر تخلیه مواد غیرزیستی و مسمومیت آب‌های آزاد بوده است. بر این اساس، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تولید (اثرات غیرمستقیم) و مصرف (اثرات مستقیم) کود شیمیایی از جمله عوامل اصلی مسموم‌سازی سامانه‌های تولید، تخلیه مواد غیرزیستی و به‌ویژه یوتریفیکاسیون تلقی می‌گردد (Saenjan & Saisompan, 2004). لذا، با التفات به روند رو به رشد آثار زیست‌محیطی در بوم‌نظام‌های برنج به‌ویژه در شرایط مصارف بیش از حد کودهای شیمیایی و عملیات فشرده خاک‌ورزی، می‌توان با مدیریت صحیح و اکولوژیک حاصلخیزکننده‌های خاک همچون خاک‌ورزی حداقل و یا کاهش‌یافته و نیز استفاده از کودهای بیولوژیک به‌منظور کاهش آثار زیان‌بار زیست‌محیطی بهره جست.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثرات زیست محیطی و مؤلفه‌های انرژی مرتبط به هر یک از سامانه‌های تولید برنج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که بالاترین میزان بهره‌وری و نسبت انرژی به سامانه ارگانیک و کمترین مقادیر آن به سامانه متداول اختصاص یافت و انرژی ورودی سوخت دیزل بالاترین سهم را در کل انرژی‌های ورودی داشته است. لذا توسعه سامانه‌های کشاورزی با حداقل انرژی ورودی نه تنها به کاهش انتشارات گازهای گلخانه‌ای بلکه به سلامت و پایداری تولید در این بوم‌نظام‌ها کمک شایانی می-کند. همچنین نتایج نشان داد که بالاترین مقادیر گروه تأثیر زیست محیطی گرمایش جهانی متعلق به سامانه‌های متداول بود که این میزان به مصرف فشرده نهاده‌ها و مدیریت خاک‌ورزی و مصرف سوخت‌های فسیلی در این سامانه‌ها مرتبط می‌باشد. با توجه به یافته-های این پژوهش و تبعات منفی زیست‌محیطی نظام‌های تولید برنج، راهکارهایی همچون مدیریت صحیح اکولوژیک، حداقل خاک‌ورزی و مدیریت صحیح بیولوژیک از جمله به‌کارگیری کودهای سبز، کودهای آلی و کمپوست، کاربرد نیترات با پوشش گوگردی، با ارتقاء پایداری نظام‌های تولید و تنوع کارکردی، مشکلات ناشی از مصرف بی‌رویه سوخت و کودهای شیمیایی را تقلیل می‌دهد. بر این اساس، سامانه-های ارگانیک به لحاظ زیست محیطی و کارایی انرژی و پس از آن سامانه‌های کم‌نهاده در مقایسه با سامانه‌های متداول، بسیار مناسب‌تر خواهند بود.

سپاسگزاری

به این وسیله، از دانشگاه علوم کشاورزی و منـابع طبیعـی سـاری به‌منظور حمایت‌های مالی برای انجام پژوهش حاضر قدردانی و تشکر به عمل می‌آید.

References

AghaAlikhani, M.., Kazemi Poshtmasari, H. and Habibzadeh, F., 2013. Energy use pattern in rice production: A case study from Mazandaran province. Iran. Energy Conversion and Management 69: 157-162. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.01.034

Bacenetti, J., Fusi, A., Negri, M., Bocchi, S., and Fiala, M., 2016. Organic production systems: Sustainability assessment of rice in Italy. Agriculture, Ecosystem and Environment 225: 33–44. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.03.046

Banaeian, N., and Zangeneh, M., 2011. Study on energy efficiency in corn production of Iran. Energy 36: 5394-5402. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.052

Baruah, D., and Dutta, P., 2007. An investigation into the energy use in relation to yield of rice (*Oryza sativa*) in Assam, India. Agriculture, Ecosystems and Environment 120: 185-191. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.09.003

Bautista E.G., and Minowa T., 2010. Analysis of the energy for different rice production systems in the Philippines. The Philippine Agricultural Scientist 93(3): 346-57.

Blengini, G.A., and Busto, M., 2009. The life cycle of rice: LCA alternative agri-food chain management systems in Vercelli (Italy). Journal of Environmental Management 90(3): 1512-22. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.10.006

Bockari-Gevao, S.M., Bin Wan Ismail, W.I., Yahya, A., and Wan, C.C., 2005. Analysis of energy consumption in lowland rice-based cropping system of Malaysia. Songklanakarin Journal of Science and Technology 27(4): 820-826.

Brentrup, F., Küsters, J., Kuhlmann, H., and Lammel, J., 2004 a. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology: I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production. European Journal of Agronomy 20(3): 247-264. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00024-8

Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., Barraclough, P., and Kuhlmann, H., 2004 b. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology: II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems. European Journal of Agronomy 20(3): 265-279. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00039-X

Chamsing, A., Salokhe, V.M., Gajendra, S., 2006. Energy consumption analysis for selected crops in different regions of Thailand. Agricultural Engineering International: The CIGR E Journal 2006: 8.

Chauhan, N.S., Mohapatra, P.K.J., and Pandey, K.P., 2006. Improving energy productivity in paddy production through bench markingd an application of data envelopment analysis. Energy Conversion and Management 47: 1063-85. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.07.004

Dalgaard, T., Halberg, N., and Fenger, J., 2000. Fossil energy use and emissions of greenhouse gases – three scenarios for conversion to 100% organic farming in Denmark. In: E. Van Lerland, A.Q. Lansink, and E. Schmieman. (Eds.), Proceedings of the International Conference on Sustainable Energy: New Challenges for Agriculture and Implications for Land Use, Wageningen, The Netherlands. Chapter 7.2.1, 11 p.

Erdal, G., Esengun, K., Erdal, H., and Gunduz, O., 2007. Energy use and economical analysis of sugar beet production in Tokat province of Turkey. Energy 32: 35–41. https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.01.007

Eskandari Cherati, F., Bahrami, H., and Asakereh, A., 2011. Energy survey of mechanized and traditional rice production system in Mazandaran Province of Iran. African Journal of Agricultural Research 6(11): 2565-70. DOI: 10.5897/AJAR11.516

Eskandari, H., and Attar, S., 2015. Energy comparison of two rice cultivation systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 42: 666-671. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.050

Esitken, A., Ercisli, S., Karlidag, H., and Sahin, F., 2005. Potential use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in organic apricot production. In: Proceedings of the international scientific conference of environmentally friendly fruit growing, Tartu-Estonia pp. 90–97.

Esengun, K., Gunduz, O., and Erdal, G., 2007. Input–output energy analysis in dry apricot production of Turkey.

Energy Conversation Management 48: 592–598. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.06.006

FAO., 2018. FAO statistical year book, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Fangueiro, D., Becerra, D., Albarrán, Á., Peña, D., Sanchez-Llerena, J., Rato-Nunes, J.M., and López-Piñeiro, A., 2017. Effect of tillage and water management on GHG emissions from Mediterranean rice growing ecosystems. Atmospheric Environment 150: 303-312. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.020

Finkbeiner, M., Inaba, A. Tan, R., Christiansen, K., and Klüppel, H.J., 2006. The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. International Journal of Life Cycle Assessment 11(2): 80-85.

Gajaseni, J., 1995. Energy analysis of wetland rice systems in Thailand. Agriculture, Ecosystems and Environment 52: 173e8. https://doi.org/10.1016/0167-8809(94)00536-N

Hatcho, N., Matsuno, Y., Kochi, K., and Nishishita, K., 2012. Assessment of environment-friendly rice farming through life cycle assessment (LCA). Chiang Mai University. Journal of Natural Science 11: 403–408.

He, X., Qiao, Y., Liang, L., Knudsen, M.T., and Martin, F., 2018. Environmental life cycle assessment of long-term organic rice production in subtropical China. Journal of Cleaner Production 176: 880-888. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.045

Heijungs, R., Guiné e, J.B., Huppes, G., Lankreijer, R.M., Udo de Haes, H.A., Wegener Sleeswijk, A., Ansems, A.M.M., Eggels, P.G., Van Duin, R., de Goede, H.P., 1992. Environmental life cycle assessment of productsÐBackgrounds and Environmental life cycle assessment of productsÐGuide. CML, TNO, B&G, Leiden.

Hokazono, S., Hayashi, K., and Sato, M., 2009. Potentialities of organic and sustainable rice production in Japan from a life cycle perspective. Agronomy Research 7 (Special issue I): 257–262.

Hokazono, S., and Hayashi, K., 2012. Variability in environmental impacts during conversion from conventional to organic farming: A comparison among three rice production systems in Japan. Journal of Cleaner Production 28: 101-112. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.005

Hokazono, S., and Hayashi, K., 2015. Life cycle assessment of organic paddy rotation systems using land and product-based indicators: a case study in Japan. The International Journal of Life Cycle Assessment 20(8): 1061–1075.

Kazemi, H., Kamkar, B., Lakzaei, S., Badsar, M., and Shahbyki, M., 2015. Energy flow analysis for rice production in different geographical regions of Iran. Energy 84: 390-396. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.005

Khan, M.A., Awan, I.U., and Zafar, J., 2009. Energy requirement and economic analysis of rice production in the western part of Pakistan. Soil and Environmental 28(1): 60-70.

Khorramdel, S., Shabahang, J., and Amin Ghafouri., A., 2017. Evaluation of environmental impacts for Rice agroecosystems using Life Cycle Assessment (LCA). Iranian Journal of Applied Ecology 5(18): 1-14 (In Persian). DOI: 10.18869/acadpub.ijae.5.18.1

Kizilaslan, H., 2009. Input-output energy analysis of cherries production in Tokat Province of Turkey. Applied Energy 86: 1354-1358. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.07.009

Koga, N., and Tajima, R., 2011. Assessing energy efficiencies and greenhouse gas emissions under bioethanol-oriented paddy rice production in northern Japan. Journal of Environmental Management 92: 967-973. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.008

IPCC. 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. 2 Inst Glob Environ Strateg Hayama, Japan.

ISO, 1997. ISO 14040-Environmental management-Life cycle assessment-principles and framework. p. 14.

Mostashari-Rad, F., Ghasemi-Mobtaker, H., Taki, M., Ghahderijani, M., Kaab, A., Chau., K.W., and Nabavi-Pelesaraei., A., 2021. Exergoenvironmental damages assessment of horticultural crops using ReCiPe2016 and cumulative exergy demand frameworks. Journal of Cleaner Production 278: 123788. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123788

Mohammadi, A., Rafiee, S., Jafari, A., Keyhani, A., Dalgaard, T., Trydeman Knudsen, M., Nguyen, T., Borek, R., and Hermansen, J.E., 2015. Joint life cycle assessment and data envelopment analysis for the benchmarking of environmental impacts in rice paddy production. Journal of Cleaner Production 106: 521-532. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.008

Mousavi-Avval, S.H., Rafiee, S., Jafari, A., and Mohammadi, A., 2011. Improving energy use efficiency of canola production using data envelopment analysis (DEA) approach. Energy 36: 2765-2772. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.016

Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S.S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H. and Chau, K.W., 2018. Integration of artificial intelligence methods and life cycle assessment to predict energy output and environmental impacts of

paddy production. Science of the Total Environment 631: 1279-1294. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.088

Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S.S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., and Chau, K.W., 2019. Comprehensive model of energy, environmental impacts and economic in rice milling factories by coupling adaptive neuro-fuzzy inference system and life cycle assessment. Journal of Cleaner Production 217: 742-756. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.228

Nassiri, M.S., and Singh, S., 2009. Study on energy use efficiency for paddy crop using data envelopment analysis (DEA) technique. Applied Energy 86: 1320-1325. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.10.007

Nemecek, T., Kägi, T., and Blaser, S., 2007. Life cycle inventories of agricultural production systems. Final report ecoinvent v2. 0 No 15. https://db.ecoinvent.org/

Nemecek, T., Huguenin-Elie, O., Dubois, D., Gaillard, G., Schaller, B., and Chervet, A., 2011. Life cycle assessment of Swiss farming systems: II. Extensive and intensive production. Agricultural System 104: 233-245. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.07.007

Ovtit-Canavate, J., and Hernanz, J.L., 1999. Energy analysis and saving. In CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Energy and Biomass Engineering. ASAE Publication. MI., p. 13-23.

Ozkan, B, Fert, C, and Karadeniz, F., 2007. Energy and cost analysis for greenhouse and open-field grape production. Energy 32: 1500e4. https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.09.010

Ozkan, B., Akcaoz, H., and Fert, C., 2011. Energy inputs and crop yield relationships in greenhouse winter crop tomato production. Renewable Energy 36(11): 3217-3221. https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.042

Pennington, D.W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliete, O., Rydberg, T., and Rebitzer, G., 2004. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. Environmental. International 30: 721–739.

Pishgar-Komleh, S.H., Sefeedpari, P., and Rafiee, S., 2011. Energy and economic analysis of rice production under different farm. Energy 36: 5824-5831. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.044

Rathke, G.W., and Diepenbrock, W., 2006. Energy balance of winter oil seed rape cropping as related to nitrogen supply and preceding crop. European Journal of Agronomy 24: 35-44. https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.04.003

Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W., Suh, S., Weidema, B.P., and Pennington, D.W., 2004. Life cycle assessment. Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. Environmental International 30: 701-720. https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005

Risoud, B., 2000. Energy efficiency of various French farming systems: Questions and sustainability. In: International Conference on Sustainable Energy: New Challenges for Agriculture and Implications for Land Use, Organized by Wageningen University, Netherlands, May PP: 18-20.

Saenjan, P., and Saisompan, C., 2004. Economic return of rice production from methane mitigated rice yields. Agriculture 20(3): 259-271.

Sahle, A., and Potting, J., 2013. Environmental life cycle assessment of Ethiopian rose cultivation. Science of the Total Environment 443: 163-172. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.048

Salami, P., and Ahmadi, H., 2010. Energy inputs and outputs in a chickpea production system in Kurdistan, Iran.
African Crop Science Journal 18(2): 51-57. DOI: 10.4314/acsj.v18i2.65796

Schröder, J.J., Aarts, H.F.M., Ten Berge, H.F.M., Van Keulen, H., and Neeteson, J.J., 2003. An evaluation of whole farm nitrogen balances and related indices for efficient nitrogen use. European Journal of Agronomy 20: 33-44. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00070-4

Steiner, A., Martonakova, H., and Guziova, Z., 2003. Environmental Governance Sourcebook. Bratislava, Slovakia: UNDP Regional Bureau for Europe and the Commonwealth of Indepencent States.

Tabatabaie, S.M.H., Rafiee, S., Keyhani, A., and Ebrahimi, A., 2013. Energy and economic assessment of prune production in Tehran province of Iran. Journal of Cleaner Production 39: 280-284. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.052

Truong, T.T.A., Fry, J., Van Hoang, P., and Ha, H.H., 2017. Comparative energy and economic analyses of conventional and System of Rice Intensification (SRI) methods of rice production in Thai Nguyen Province, Vietnam. Paddy and Water Environment1 5(4): 931-941.

Xu, X., Zhang, B., Liu, Y., Xue, Y., and Di, B., 2013. Carbon footprints of rice production in five typical rice districts in China. Acta Ecologica Sinica 33: 227-232. https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2013.05.010

Yodkhum, S., Gheewala, S.H., and Sampattagul, S., 2017. Life cycle GHG evaluation of organic rice production in

northern Thailand. Journal of Environmental Management 196: 217-223. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.004
Yousefi, M., Khoramivafa, M. and Damghani, A.M., 2017. Water footprint and carbon footprint of the energy consumption in sunflower agroecosystems. Environmental Science and Pollution Research 24: 19827-19834.
Yousefi, M., and Mohammadi, A., 2011. Economical analysis and energy use efficiency in alfalfa production systems in Iran. Scientific Research and Essays 6: 2332–2336. DOI: 10.5897/SRE11.015
Yuan, S., and Peng, S., 2017. In put-output energy analysis of rice production in different crop management practices in central China. Energy 141: 1124-1132. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.007